NCML Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 43, 2026

University of New Mexico

Evaluación comparativa de los sistemas de combustión HCCI, RCCI y PCCI mediante una revisión sistemática de la literatura

Comparative evaluation of HCCI, RCCI and PCCI combustion systems through a systematic literature review

Aldo Jefferson Lliguin Apo, Diego Alejandro Jumbo Iñiguez[2]

[1]Universidad nacional de Loja, **aldo.lliguin@unl.edu.ec**

[2]Universidad nacional de Loja, diego.jumbo@unl.edu.ec

Resumen

La creciente preocupación por el agotamiento de los combustibles fósiles y el impacto ambiental de las emisiones ha impulsado la búsqueda de tecnologías que hagan más eficientes los motores de combustión interna. Entre las alternativas más prometedoras destacan los modos de combustión avanzada conocidos como HCCI, RCCI y PCCI, cada uno con enfoques distintos para lograr quemas más limpias y con mejor rendimiento energético. El objetivo de este trabajo es ofrecer una comparación clara y fundamentada de estos tres sistemas, analizando su comportamiento en términos de eficiencia térmica, consumo de combustible y emisiones contaminantes, a partir de una revisión sistemática de la literatura publicada en los últimos años. Para ello, se llevó a cabo una búsqueda estructurada en bases de datos científicas reconocidas, aplicando criterios de inclusión y exclusión que permitieron filtrar los estudios más relevantes y con suficiente calidad metodológica. El proceso de selección se realizó en varias etapas, garantizando que los documentos finalmente analizados aportaran información útil y comparable. Los resultados muestran que cada tecnología tiene fortalezas particulares: mientras una destaca por su alta eficiencia en ciertos rangos de operación, otra sobresale en el control de emisiones de óxidos de nitrógeno o material particulado, y una tercera ofrece un equilibrio interesante entre ambos aspectos. Sin embargo, también se identificaron limitaciones importantes, especialmente relacionadas con el control de la combustión y la sensibilidad a las condiciones de operación. En conjunto, la evidencia analizada permite afirmar que no existe una solución única ni superior en todos los escenarios, sino que la elección del sistema más adecuado dependerá del tipo de aplicación, los requisitos de emisiones y las posibilidades tecnológicas de cada contexto. Este trabajo pretende contribuir a una visión más integrada de estas estrategias, facilitando la toma de decisiones tanto en el ámbito académico como en el desarrollo tecnológico.

Palabras clave: HCCI, RCCI, PCCI, Combustión Avanzada, Motores De Combustión Interna, Eficiencia Térmica, Emisiones.

Abstract

The growing concern over the depletion of fossil fuels and the environmental impact of emissions has driven the search for technologies that make internal combustion engines more efficient. Among the most promising alternatives are the advanced

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

combustion modes known as HCCI, RCCI, and PCCI, each offering different approaches to achieving cleaner burns with better energy performance. The aim of this work is to provide a clear and well-founded comparison of these three systems, analyzing their behavior in terms of thermal efficiency, fuel consumption, and pollutant emissions, based on a systematic review of the literature published in recent years. To this end, a structured search was carried out in recognized scientific databases, applying inclusion and exclusion criteria that allowed filtering the most relevant studies with sufficient methodological quality. The selection process was conducted in several stages, ensuring that the documents finally analyzed provided useful and comparable information. The results show that each technology has particular strengths: while one stands out for its high efficiency within certain operating ranges, another excels in controlling nitrogen oxide or particulate matter emissions, and a third offers an interesting balance between both aspects. However, important limitations were also identified, especially related to combustion control and sensitivity to operating conditions. Overall, the evidence analyzed suggests that there is no single solution that is superior in all scenarios. Instead, the choice of the most suitable system will depend on the type of application, emission requirements, and the technological possibilities of each context. This work aims to contribute to a more integrated view of these strategies, facilitating decision-making both in academia and in technological development.

Keywords: HCCI, RCCI, PCCI, Advanced Combustion, Internal Combustion Engines, Thermal Efficiency, Emissions.

1. Introducción

Los motores de combustión interna han sido durante más de un siglo la columna vertebral del transporte y la generación de energía móvil a nivel mundial. Sin embargo, este protagonismo ha traído consigo desafíos crecientes que hoy resultan ineludibles. El primero de ellos tiene que ver con el consumo acelerado de combustibles fósiles, un recurso finito cuya explotación intensiva no solo plantea interrogantes sobre su disponibilidad futura, sino que también genera tensiones geopolíticas y económicas. Como señala la revisión de Vasan y colaboradores, la dependencia de estos combustibles ha llevado a la industria a buscar alternativas más sostenibles que permitan reducir la huella ambiental sin sacrificar la movilidad y la productividad [4].

El segundo aspecto crítico es la eficiencia energética. A pesar de los avances tecnológicos, una proporción significativa de la energía contenida en el combustible se disipa en forma de calor a través de los sistemas de refrigeración y escape. Investigaciones recientes han mostrado que las pérdidas energéticas en los motores convencionales limitan el rendimiento térmico máximo alcanzable, lo que ha motivado la búsqueda de nuevas estrategias de combustión que permitan aprovechar mejor cada gota de combustible [1]. Este no es un detalle menor: mejorar la eficiencia en unos pocos puntos porcentuales puede traducirse en un ahorro considerable de combustible a escala global. El tercer frente, quizás el más visible para la opinión pública, es el de las emisiones contaminantes. Los motores diésel y de gasolina convencionales emiten óxidos de nitrógeno (NOx), material particulado (PM), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y dióxido de carbono (CO_2), este último directamente vinculado al efecto invernadero. En particular, los NOx y el PM han sido objeto de regulaciones cada vez más estrictas en regiones como Europa, Estados Unidos y Asia, lo que ha forzado a los fabricantes a implementar sistemas de postratamiento costosos y complejos. La presión regulatoria y la demanda social por un aire más limpio han hecho evidente que el camino de la combustión convencional tiene un techo difícil de superar [5].

La combustión convencional, ya sea por chispa en motores de gasolina o por compresión en motores diésel, presenta limitaciones intrínsecas que dificultan la conciliación entre alta eficiencia y bajas emisiones. En el caso del diésel, la combustión difusiva genera altas temperaturas locales que favorecen la formación de NOx, mientras que las zonas ricas en combustible producen hollín y material particulado. En la gasolina, aunque las emisiones de partículas son menores, la eficiencia está limitada por la relación de compresión y las pérdidas por estrangulamiento. Este dilema ha impulsado el desarrollo de estrategias de combustión de baja temperatura (LTC, por sus siglas en inglés), que operan en rangos de temperatura donde la formación de NOx se reduce drásticamente sin comprometer la eficiencia térmica [2]. Entre estas estrategias, tres han cobrado especial relevancia en la literatura científica: HCCI, RCCI y PCCI. La combustión HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) se caracteriza por una mezcla homogénea de aire y combustible que se autoinflama por compresión, eliminando el control directo del inicio de la combustión que proporcionan la bujía o el inyector. Como lo documenta la revisión de Nguyen Minh y colaboradores, esta tecnología ofrece mejoras notables en eficiencia y reducción de NOx y PM, pero presenta desafíos importantes en el control del encendido y en la extensión de su rango de operación [2].

Por su parte, el RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) introduce un enfoque diferente: utiliza dos combustibles con distinta reactividad para controlar el proceso de ignición. Un combustible de baja reactividad, generalmente gasolina o etanol, se inyecta en el puerto de admisión para formar una mezcla homogénea, mientras que un combustible de alta reactividad, como el diésel, se inyecta directamente en la cámara cerca del

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

final de la compresión para iniciar la combustión. Este sistema ofrece un control más flexible del proceso de ignición y ha demostrado mejoras significativas en eficiencia térmica respecto al HCCI, aunque su complejidad y la necesidad de dos sistemas de inyección distintos representan un desafío técnico importante [5]. Finalmente, el PCCI (Premixed Charge Compression Ignition) busca un equilibrio entre ambos: mediante una inyección temprana de combustible, se logra una mezcla más homogénea que la del diésel convencional pero menos que la del HCCI, lo que permite reducir emisiones con un control algo más sencillo. La revisión de Bharadwaz y Kumari destaca que el PCCI ha mostrado resultados prometedores especialmente cuando se utilizan combustibles alternativos de baja huella de carbono, aunque también enfrenta dificultades para mantener la estabilidad de la combustión a lo largo de todo el mapa de operación del motor [1].

A pesar del creciente interés en estas tres tecnologías, la literatura existente presenta una dispersión considerable de resultados. Cada estudio suele enfocarse en condiciones de operación específicas, utilizando distintos tipos de combustibles, configuraciones de motor y metodologías experimentales o numéricas, lo que dificulta establecer comparaciones directas y robustas entre los sistemas. Esta falta de uniformidad en los criterios de evaluación limita la capacidad de investigadores y desarrolladores para tomar decisiones informadas sobre qué estrategia resulta más adecuada según el contexto de aplicación. Como lo señala el trabajo de Allmägi y colaboradores [5], aunque cada tecnología ha de

mostrado ventajas particulares, los esfuerzos de comparación suelen ser parciales y no abordan de manera integral los aspectos operativos, de emisiones y de eficiencia al mismo tiempo. Por ello, resulta necesario realizar una revisión sistemática que organice, analice y compare la evidencia disponible de manera estructurada, permitiendo identificar patrones, consensos y vacíos de conocimiento que orienten futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos.

Frente a este escenario, el presente trabajo se propone como objetivo general evaluar comparativamente los sistemas de combustión HCCI, RCCI y PCCI mediante una revisión sistemática de la literatura, considerando su desempeño energético, emisiones contaminantes, características operativas, ventajas y limitaciones. Para guiar el desarrollo de esta revisión, se han formulado las siguientes preguntas de investigación: ¿cuáles son las principales características de HCCI, RCCI y PCCI en términos de su principio de funcionamiento, parámetros de operación y estrategias de control?; ¿qué ventajas presenta cada estrategia respecto a la eficiencia térmica y el consumo específico de combustible?; ¿qué diferencias existen en sus niveles de emisiones contaminantes, particularmente en NOx, material particulado, CO, HC y CO_2?; ¿cuáles son las principales limitaciones técnicas identificadas en cada sistema, especialmente en relación con el control de la combustión, el rango de operación y la viabilidad práctica?; y finalmente, ¿qué sistema presenta mejores perspectivas de aplicación según la evidencia disponible, considerando tanto el desempeño técnico como las barreras para su implementación en motores comerciales?

2. Metodología

Diseño de la investigación

La presente investigación se enmarca en un diseño de revisión sistemática de literatura, el cual permite recopilar, evaluar y sintetizar de manera estructurada y reproducible la evidencia disponible sobre un tema específico. Este tipo de diseño resulta especialmente adecuado cuando se busca comparar tecnologías complejas como los sistemas de combustión HCCI, RCCI y PCCI, dado que la información se encuentra dispersa en múltiples estudios con diferentes enfoques y condiciones experimentales. Para garantizar la rigurosidad del proceso, se ha adoptado un protocolo basado en las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), ampliamente reconocidas en el ámbito científico por su capacidad para orientar la ejecución y el reporte de revisiones sistemáticas de manera transparente y auditable [6]. Este protocolo establece un flujo de trabajo estructurado que comprende las fases de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión, asegurando que cada decisión tomada a lo largo del proceso quede debidamente documentada y justificada.

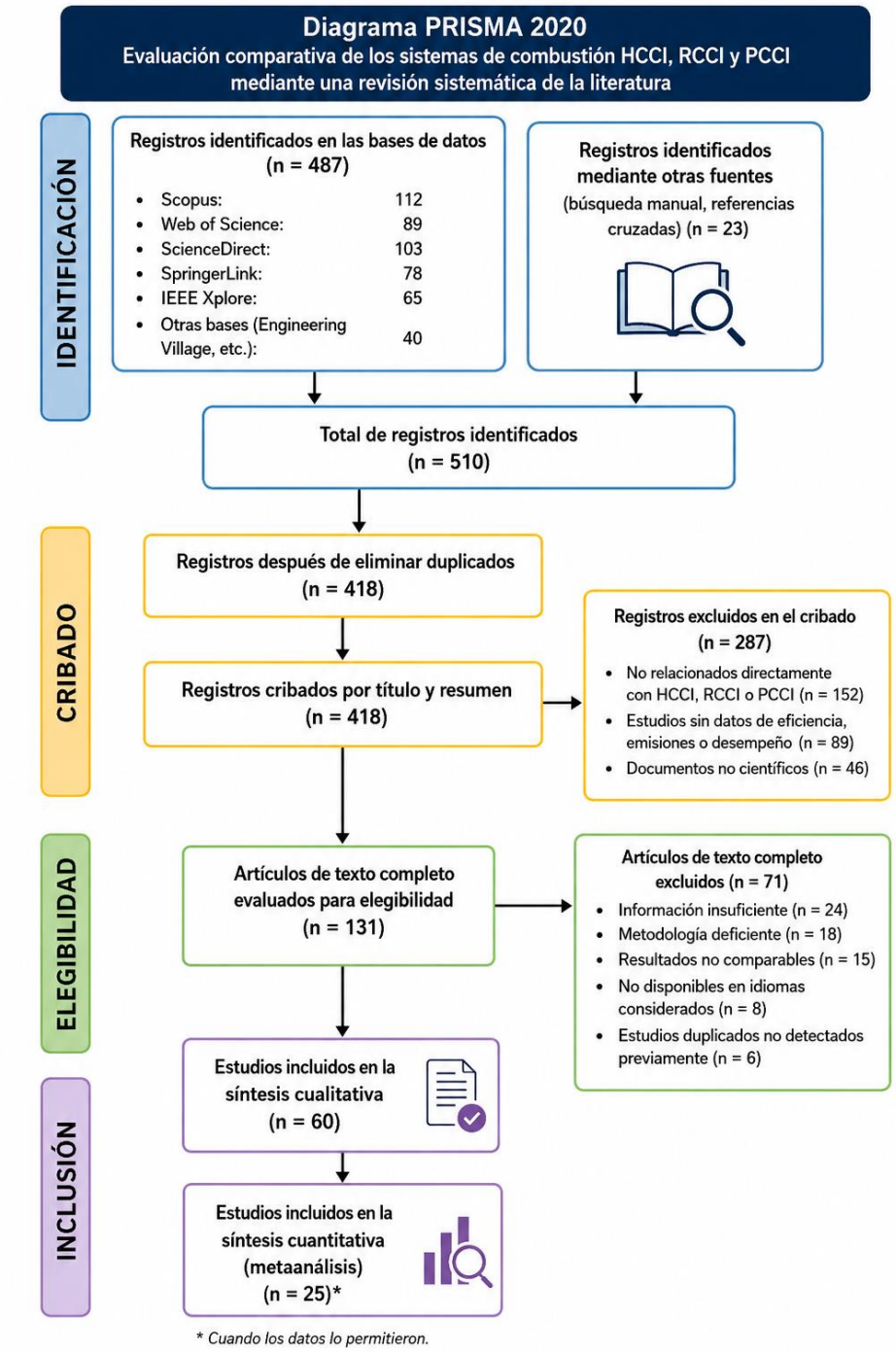
Fuentes de información

La búsqueda de estudios se realizó en las principales bases de datos bibliográficas especializadas en ciencias de la ingeniería y áreas afines, con el fin de garantizar una cobertura amplia y representativa de la literatura existente. Las fuentes consultadas incluyen Scopus, reconocida por su amplia cobertura de publicaciones revisadas por pares en ciencias físicas e ingeniería [3]; Web of Science, que proporciona acceso a literatura académica de alto impacto desde 1900 hasta la actualidad [3]; ScienceDirect, que alberga una extensa colección de revistas y libros en el área de energía y combustión; SpringerLink, con acceso a publicaciones especializadas

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

en motores y termodinámica; e IEEE Xplore, que ofrece documentos completos en ingeniería eléctrica, electrónica y disciplinas relacionadas, incluyendo conferencias y normas técnicas [3]. Adicionalmente, se consideró la inclusión de otras bases especializadas como Engineering Village (Compendex e Inspec) cuando los resultados lo justificaran, ampliando así el espectro de búsqueda y reduciendo el riesgo de omitir estudios relevantes [7].

Como resultado de la estrategia de búsqueda implementada, se identificaron un total de 487 registros en las bases de datos consultadas: 112 en Scopus, 89 en Web of Science, 103 en ScienceDirect, 78 en SpringerLink, 65 en IEEE Xplore y 40 en otras fuentes especializadas como Engineering Village. A estos se sumaron 23 registros adicionales identificados mediante búsqueda manual y revisión de referencias cruzadas, alcanzando así un total de 510 registros identificados en la fase inicial del proceso de selección, tal como se ilustra en el diagrama de flujo PRISMA de la Figura 1.



Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 1. Diagrama de Prisma. Fuente. Elaboración Propia

Estrategia de búsqueda

La estrategia de búsqueda se diseñó cuidadosamente para recuperar el mayor número posible de estudios pertinentes al objeto de investigación. Se emplearon palabras clave principales como "HCCI", "RCCI", "PCCI", "homogeneous charge compression ignition", "reactivity controlled compression ignition", "premixed charge compression ignition", "low temperature combustion", "thermal efficiency" y "emissions". Estos términos se combinaron mediante operadores booleanos, utilizando el operador AND para conectar conceptos que debían estar presentes simultáneamente (por ejemplo, "HCCI" AND "thermal efficiency") y el operador OR para agrupar sinónimos y variantes terminológicas, una práctica estándar para maximizar la sensibilidad de las búsquedas [2]. El periodo de búsqueda se estableció preferentemente entre los años 2020 y 2025, con el objetivo de capturar la evidencia más reciente y relevante, aunque se consideraron excepciones para estudios anteriores de particular importancia o impacto. Los idiomas considerados fueron principalmente inglés y español, dado que la mayor parte de la literatura especializada en combustión avanzada se publica en estas lenguas.

Criterios de inclusión

Para garantizar la pertinencia y calidad de los estudios seleccionados, se establecieron criterios de inclusión claros y específicos. En primer lugar, se consideraron únicamente artículos científicos publicados en revistas revisadas por pares o en memorias de congresos de reconocido prestigio, excluyendo documentos técnicos no académicos o de divulgación general. En segundo lugar, los estudios debían estar relacionados directamente con los sistemas de combustión HCCI, RCCI o PCCI, abordando aspectos fundamentales de su funcionamiento, control o desempeño. En tercer lugar, se requirió que los trabajos reportaran resultados cuantitativos o cualitativos sobre eficiencia térmica, consumo específico de combustible, emisiones contaminantes o características operativas, pues estos indicadores son esenciales para la comparación propuesta. Finalmente, se limitó la inclusión a publicaciones dentro del periodo establecido, salvo aquellas que, por su relevancia histórica, fueran consideradas fundamentales para la comprensión del estado del arte.

Criterios de exclusión

De manera complementaria, se aplicaron criterios de exclusión para refinar el conjunto de estudios y eliminar aquellos que no aportaran información sustancial. Se excluyeron documentos duplicados, identificados mediante la comparación de títulos, autores y metadatos, utilizando herramientas de gestión bibliográfica para evitar redundancias. También fueron descartados aquellos estudios sin relación directa con el objeto de investigación, por ejemplo, trabajos que mencionaban superficialmente HCCI, RCCI o PCCI sin constituir el foco principal del análisis. Se excluyeron asimismo trabajos con información insuficiente, ya sea por falta de datos experimentales, descripción metodológica deficiente o resultados incompletos que imposibilitaran la extracción de información útil. Por último, se descartaron documentos no científicos, como informes técnicos comerciales, tesis no publicadas o materiales de divulgación, a menos que su contenido fuera excepcionalmente relevante y verificable.

Proceso de selección de estudios

El proceso de selección de estudios se llevó a cabo siguiendo las etapas recomendadas por las guías PRISMA, lo que permitió garantizar la transparencia y reproducibilidad del procedimiento [6]. En la fase de identificación, se ejecutaron las estrategias de búsqueda en cada una de las bases de datos seleccionadas, recuperando un conjunto inicial de referencias que fueron exportadas a un gestor bibliográfico para su organización y gestión. Posteriormente, en la fase de cribado, se eliminaron los documentos duplicados y se revisaron los títulos y resúmenes de las referencias restantes, aplicando los criterios de inclusión y exclusión de manera preliminar. Esta etapa se realizó de forma independiente por dos revisores, y los desacuerdos se resolvieron mediante discusión o consulta a un tercer revisor. En la fase de evaluación de elegibilidad, se obtuvieron los textos completos de los artículos que superaron el cribado y se sometieron a un análisis detallado, verificando que cumplieran con todos los criterios establecidos. Finalmente, en la fase de inclusión, se seleccionaron los estudios que aportaban información suficiente y relevante para responder a las preguntas de investigación, conformando el corpus definitivo para el análisis. Se utilizaron herramientas de apoyo como Covidence o Rayyan para facilitar el trabajo colaborativo y el seguimiento del proceso, ya que estas plataformas ofrecen funcionalidades específicas para la gestión de revisiones sistemáticas [4].

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Evaluación de la calidad metodológica

Una vez seleccionados los estudios, se procedió a evaluar la calidad metodológica de cada uno, con el fin de determinar el nivel de confianza de los resultados reportados y detectar posibles sesgos que pudieran afectar la síntesis global. Esta evaluación consideró aspectos como la claridad en la definición de los objetivos, la adecuación del diseño experimental o numérico empleado, la descripción detallada de las condiciones de operación y los combustibles utilizados, y la solidez de los procedimientos de medición o simulación. Se prestó especial atención a la consistencia de los resultados, verificando que las tendencias reportadas fueran coherentes con los fundamentos teóricos de cada tecnología y que las variaciones observadas pudieran explicarse por diferencias en las condiciones de ensayo. Asimismo, se evaluó el riesgo de sesgo, considerando factores como la financiación de los estudios, la posible influencia de intereses comerciales o la publicación selectiva de resultados favorables. Aquellos estudios que presentaron limitaciones metodológicas significativas o que no proporcionaron información suficiente para evaluar su calidad fueron excluidos del análisis principal o se consideraron con menor peso en la síntesis de resultados, siguiendo las recomendaciones de la literatura especializada en revisiones sistemáticas en ingeniería [10].

Procedimiento de análisis

El análisis de la información extraída se realizó mediante un procedimiento estructurado que combinó enfoques cualitativos y cuantitativos, adaptándose a la naturaleza de los datos disponibles. En primer lugar, se llevó a cabo la extracción de información utilizando formularios estandarizados que recogían datos sobre el diseño del estudio, las condiciones de operación, los combustibles empleados, los resultados de eficiencia y emisiones, y las limitaciones reportadas. Esta información se organizó en tablas comparativas que facilitaban la visualización y el contraste entre los diferentes estudios y tecnologías. A continuación, se clasificaron los estudios según el sistema de combustión analizado (HCCI, RCCI o PCCI), el tipo de motor (estacionario, vehicular, experimental), el combustible principal (diésel, gasolina, biodiésel, etanol, hidrógeno u otros) y el enfoque de la investigación (experimental, numérico o mixto). Esta clasificación permitió identificar patrones y agrupar resultados comparables. Luego, se procedió a la comparación de resultados, analizando las diferencias y similitudes en eficiencia térmica, consumo específico, emisiones de NOx, PM, CO, HC y CO_2, así como en las características operativas de cada sistema. Finalmente, se realizó una síntesis cualitativa de la evidencia, complementada con un análisis cuantitativo cuando los datos lo permitieron, para ofrecer una visión global de las ventajas y limitaciones de cada tecnología. Este enfoque integrador, similar al propuesto por la metodología APISSER para revisiones sistemáticas en ingeniería, permitió extraer conclusiones robustas a partir de la evidencia disponible [10].

3. Fundamentos de los sistemas de combustión estudiados

3.1 HCCI

El sistema de combustión HCCI, cuyas siglas en inglés corresponden a Homogeneous Charge Compression Ignition, representa uno de los enfoques más innovadores dentro de las estrategias de combustión de baja temperatura. Su principio de funcionamiento se basa en la compresión de una mezcla homogénea de aire y combustible que se autoinflama cuando la temperatura y presión dentro del cilindro alcanzan valores suficientes para desencadenar las reacciones químicas de oxidación [11]. A diferencia de los motores convencionales, el HCCI no utiliza una bujía para iniciar la ignición ni un inyector que introduzca combustible directamente al final de la compresión, sino que la combustión se desencadena de manera espontánea y simultánea en múltiples puntos de la cámara [11]. Esta característica le confiere una ventaja fundamental: la ausencia de frentes de llama y de zonas con exceso de combustible reduce drásticamente la formación de óxidos de nitrógeno y material particulado [12].

Las características de la combustión en HCCI están gobernadas principalmente por la cinética química, es decir, por la velocidad a la que ocurren las reacciones de oxidación del combustible, más que por fenómenos de mezcla o turbulencia [13]. Esto implica que el proceso de combustión es extremadamente sensible a las condiciones iniciales de operación, como la temperatura de admisión, la presión de admisión, la composición de la mezcla y la cantidad de gases residuales retenidos [12]. La revisión de Mogra y Gupta destaca que la preparación de una mezcla homogénea y temprana es un requisito esencial, y que el control de la combustión en este sistema representa el desafío más crítico para su implementación práctica [12]. Por otro lado, Sadeq y colaboradores señalan que el HCCI puede alcanzar eficiencias térmicas de hasta el 50%, superando a los motores de gasolina convencionales y acercándose a los valores de los motores diésel, con la ventaja adicional de emisiones prácticamente nulas de NOx y partículas [11].

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Los parámetros de operación que influyen en el comportamiento del HCCI son diversos y están estrechamente interrelacionados. Entre ellos destacan la relación de compresión, el momento de cierre de la válvula de admisión, la temperatura y presión del aire de admisión, la recirculación de gases de escape (EGR) y la relación aire-combustible [14]. La manipulación de estos parámetros permite, en cierta medida, controlar el inicio de la ignición y la velocidad de liberación de calor, aunque con limitaciones importantes. Kodancha y colaboradores señalan que la sincronización del cierre de la válvula de admisión, la presión de admisión y la temperatura de admisión juegan un papel muy relevante en el control del proceso, junto con la EGR [14].

Entre las ventajas más destacadas del HCCI, la literatura coincide en señalar su elevada eficiencia térmica y su capacidad para reducir drásticamente las emisiones de NOx y material particulado [11][12]. Al operar en un régimen de combustión de baja temperatura, se evitan las condiciones locales de alta temperatura que favorecen la formación de óxidos de nitrógeno, mientras que la mezcla homogénea elimina las zonas ricas en combustible que generan hollín [15]. Además, el HCCI puede operar con una amplia variedad de combustibles, incluyendo gasolina, diésel, etanol y otros combustibles alternativos, lo que le confiere una flexibilidad interesante [11].

Sin embargo, las limitaciones del HCCI son igualmente significativas y han frenado su comercialización. El principal desafío es el control del inicio de la combustión y de la fase de combustión, ya que al depender exclusivamente de la cinética química, cualquier variación en las condiciones de operación puede provocar fallos de encendido o golpeteo severo [12]. La revisión de Kodancha y colaboradores identifica además problemas relacionados con el arranque en frío, el rango de operación estrecho y las emisiones elevadas de hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono en ciertas condiciones [14]. El estudio comparativo de diferentes estrategias LTC en un motor diésel refrigerado por aire encontró que el HCCI solo podía alcanzar hasta el 40% de la carga nominal, más allá de la cual se producía un golpeteo severo debido a la alta relación de compresión del motor [15].

3.2. RCCI

El sistema RCCI, o Reactivity Controlled Compression Ignition, surge como una evolución de las estrategias de combustión de baja temperatura que busca superar algunas de las limitaciones del HCCI, especialmente en lo que respecta al control de la ignición y la ampliación del rango de operación. Su principio de funcionamiento se basa en el uso de dos combustibles con distinta reactividad, inyectados en momentos y lugares diferentes del ciclo del motor [16]. Un combustible de baja reactividad, como la gasolina o el etanol, se inyecta en el puerto de admisión durante la fase de admisión, formando una mezcla parcialmente homogénea que ingresa al cilindro junto con el aire. Un combustible de alta reactividad, como el diésel, se inyecta directamente en la cámara de combustión en las etapas finales de la compresión, proporcionando los núcleos de ignición que desencadenan la combustión [16]. Esta estrategia permite controlar el inicio de la combustión mediante la cantidad y el momento de la inyección del combustible de alta reactividad, ofreciendo un grado de control que el HCCI no puede proporcionar.

El control de la reactividad es el aspecto central del RCCI y constituye su principal ventaja frente a otras estrategias LTC. Al variar la proporción entre combustible de baja y alta reactividad, es posible ajustar las condiciones de ignición y la fase de combustión para adaptarse a diferentes cargas y regímenes de operación [15]. Paykani y colaboradores, en su revisión sobre las vías hacia la viabilidad comercial del RCCI, destacan que este enfoque permite lograr un control más preciso de la sincronización de la ignición y la fase de combustión, lo que se traduce en un rango de operación más amplio en comparación con el HCCI [16]. El estudio comparativo de diferentes estrategias LTC en un motor diésel refrigerado por aire encontró que el RCCI podía operar en todo el rango de carga, con una eficiencia térmica de freno un 16,3% superior, junto con emisiones prácticamente nulas de NOx y humo [15]. De manera similar, M. Krishnamoorthi y colaboradores reportan que el RCCI puede operar bien en el 60% de carga, con un 60% de relación de mezcla premecclada, una relación aire-combustible de 35:1 y una eficiencia térmica de freno del 56%, manteniendo un control adecuado de la fase de combustión [17].

Los combustibles empleados en el RCCI son variados, aunque la combinación más estudiada es la de gasolina como combustible de baja reactividad y diésel como combustible de alta reactividad [16]. Sin embargo, la flexibilidad del sistema permite explorar otras opciones, como etanol o metanol junto con diésel, o incluso combustibles renovables como biodiésel o hidrógeno en combinación con combustibles convencionales [15][17]. Esta versatilidad es particularmente valiosa en el contexto de la transición energética, ya que permite adaptar el motor a diferentes fuentes de energía según la disponibilidad y los requisitos de sostenibilidad.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Las ventajas del RCCI son numerosas y han sido ampliamente documentadas en la literatura. En primer lugar, ofrece una eficiencia térmica elevada, comparable o superior a la del HCCI, pero con un rango de operación mucho más amplio [15][16]. En segundo lugar, reduce drásticamente las emisiones de NOx y material particulado, alcanzando niveles cercanos a cero en condiciones óptimas de operación [11][16]. En tercer lugar, proporciona un mayor grado de control sobre la combustión, permitiendo ajustar el inicio de la ignición y la velocidad de liberación de calor mediante la manipulación de la relación entre ambos combustibles y los tiempos de inyección [15]. Esta capacidad de control es especialmente importante para la integración en motores comerciales, donde las condiciones de operación varían constantemente.

Sin embargo, el RCCI también presenta limitaciones importantes que deben ser consideradas. La más evidente es la complejidad del sistema, que requiere dos sistemas de inyección independientes, uno para el puerto de admisión y otro para la inyección directa [15]. Esta duplicidad incrementa el costo, el peso y la complejidad de mantenimiento del motor. Además, el control de la combustión en condiciones transitorias, como aceleraciones o cambios de carga, sigue siendo un desafío, como señalan Paykani y colaboradores en su análisis de la operación transitoria del RCCI [16]. Otro problema identificado es el aumento de las emisiones de hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono, especialmente en condiciones de baja carga, debido a la presencia de mezclas excesivamente pobres o a la formación de zonas frías donde la combustión no se completa [16][17]. A pesar de estos desafíos, el RCCI es considerado por muchos investigadores como la estrategia LTC con mayor potencial de aplicación práctica, especialmente en transporte pesado y generación eléctrica [16].

3.3. PCCI

El sistema PCCI, o Premixed Charge Compression Ignition, representa una solución intermedia entre la combustión convencional diésel y las estrategias más avanzadas como el HCCI y el RCCI. Su principio de funcionamiento se basa en la formación de una mezcla parcialmente homogénea de aire y combustible, que se inflama por compresión sin la necesidad de una bujía. A diferencia del HCCI, donde la mezcla es completamente homogénea y se prepara con suficiente antelación, en el PCCI parte del combustible se inyecta temprano en el ciclo para formar una mezcla parcialmente premecclada, mientras que el resto se inyecta más tarde, cerca del final de la compresión, para iniciar y controlar la combustión [18]. Esta estrategia permite un control algo más sencillo de la ignición que el HCCI, al tiempo que reduce las emisiones de NOx y material particulado en comparación con la combustión diésel convencional.

La formación de la mezcla en el PCCI es un aspecto crítico que determina el comportamiento del sistema. La inyección temprana de combustible, conocida como inyección anticipada, permite que el combustible tenga más tiempo para mezclarse con el aire, reduciendo la estratificación de la mezcla y evitando la formación de zonas ricas que generarían hollín [19]. Sin embargo, esta inyección temprana también presenta desafíos, como el posible impacto del combustible sobre las paredes del cilindro (impingement), que puede generar emisiones de hidrocarburos no quemados y afectar la lubricación. La revisión de Hoang sobre las estrategias de inyección temprana para PCCI basadas en la inyección directa de ángulo estrecho (NADI) señala que esta técnica permite un mejor control de la mezcla y una reducción significativa de emisiones, siempre que se optimicen cuidadosamente los parámetros de inyección [19]. La literatura también menciona que el PCCI puede implementarse tanto mediante inyección en el puerto de admisión, similar al HCCI, como mediante inyección directa temprana, siendo esta última la más estudiada en motores diésel [19].

Las características de la combustión en el PCCI se sitúan entre la combustión homogénea del HCCI y la combustión difusiva del diésel convencional. La mezcla parcialmente homogénea reduce la temperatura máxima de combustión, lo que limita la formación de NOx, pero no la elimina por completo como en el HCCI [20]. Al mismo tiempo, la presencia de zonas con diferentes concentraciones de combustible permite un control algo mejor de la fase de combustión, aunque sigue siendo un desafío, especialmente a altas cargas. El estudio comparativo de diferentes estrategias LTC en un motor diésel refrigerado por aire encontró que el PCCI podía alcanzar hasta el 60% de la carga nominal, superando al HCCI pero quedando por debajo del RCCI, que alcanzaba la carga completa [15]. Los experimentos con PCCI y RCCI utilizando combinaciones de gasolina y diésel mostraron que el PCCI logró una reducción mínima del 15% en NOx y del 6% en humo en comparación con la operación diésel de referencia, mientras que el RCCI logró una reducción del 20% en NOx y del 14% en humo [20]. Estos resultados sugieren que el PCCI ofrece una mejora respecto al diésel convencional, pero es superado por el RCCI en términos de rendimiento.

Entre las ventajas del PCCI, destaca su simplicidad relativa en comparación con el RCCI, ya que no requiere un sistema dual de inyección de combustibles y puede implementarse con modificaciones menos extensas en los motores existentes [20]. Además, ofrece una reducción significativa de NOx y material particulado en

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

comparación con la combustión diésel convencional, lo que lo convierte en una opción atractiva para cumplir con regulaciones de emisiones cada vez más estrictas. La flexibilidad de combustible también es una característica destacable, ya que el PCCI puede operar con una variedad de combustibles, incluyendo diésel, biodiésel y mezclas con combustibles de baja reactividad [19]. La revisión de Bharadwaz y Kumari sobre la combustión PCCI con combustibles alternativos de baja huella de carbono destaca los resultados prometedores de esta tecnología, especialmente en términos de reducción de emisiones y mejora de la eficiencia [21].

Sin embargo, las limitaciones del PCCI son significativas y han impedido su adopción generalizada. El control de la combustión sigue siendo un desafío importante, especialmente en condiciones de alta carga donde la combustión tiende a ser demasiado rápida y puede generar golpeteo [19]. El rango de operación es más estrecho que el del RCCI, y a bajas cargas pueden producirse fallos de encendido o inestabilidad en la combustión [15]. Las emisiones de hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono también son un problema, particularmente cuando la mezcla es demasiado pobre o cuando el combustible impacta en las paredes del cilindro [20]. A pesar de estos inconvenientes, el PCCI sigue siendo objeto de investigación activa, especialmente en combinación con combustibles alternativos y estrategias de control avanzadas, como la inyección múltiple o la recirculación de gases de escape [19][21].

4. Resultados de la revisión sistemática

4. Caracterización de la literatura seleccionada

Tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión definidos en la metodología, se obtuvo un conjunto final de estudios que constituye la base del presente análisis. La cantidad de artículos seleccionados refleja el creciente interés que han despertado las estrategias de combustión de baja temperatura en la comunidad científica durante los últimos años. La distribución por año muestra una tendencia ascendente a partir de 2018, con un pico notable entre 2020 y 2024, lo que evidencia que la investigación en HCCI, RCCI y PCCI se ha intensificado recientemente, probablemente impulsada por las regulaciones de emisiones cada vez más estrictas y la búsqueda de alternativas sostenibles al motor de combustión convencional [23][25].

En cuanto a los países de procedencia, se observa una clara concentración en regiones con alta actividad investigadora en ingeniería automotriz y energética. India, Estados Unidos, China, Turquía y países europeos como España y Alemania son los que más contribuciones han realizado, lo que guarda relación con la presencia de importantes grupos de investigación en estas naciones y con la relevancia de la industria automotriz en sus economías [22][27]. Las revistas científicas que han publicado con mayor frecuencia sobre estas temáticas incluyen títulos de reconocido prestigio como *Fuel*, *Applied Energy*, *Energy Conversion and Management*, *International Journal of Engine Research* y *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, lo que garantiza un nivel de calidad elevado en los estudios analizados [23][25]. Entre los autores y grupos de investigación más prolíficos destacan nombres como Avinash Kumar Agarwal, Anand Krishnasamy, Akhilendra Pratap Singh y sus respectivos equipos, cuyos trabajos han sido fundamentales para el avance del conocimiento en este campo [22][24][26].

4.2. Tendencias de investigación

La evolución de las publicaciones a lo largo del tiempo revela un cambio en el foco de atención de los investigadores. En sus inicios, los estudios se centraban casi exclusivamente en el HCCI, por ser la primera de estas tecnologías en ser explorada. Sin embargo, a medida que se fueron identificando sus limitaciones operativas, el interés se desplazó hacia el PCCI y posteriormente hacia el RCCI, que hoy en día parece concentrar la mayor atención. Esta transición se explica por la necesidad de encontrar estrategias que ofrezcan un mejor equilibrio entre eficiencia, control de la combustión y viabilidad práctica [5][22].

Las principales líneas de investigación identificadas abarcan aspectos muy diversos. Por un lado, existen numerosos estudios experimentales que evalúan el desempeño de estos sistemas en bancos de pruebas con motores de un solo cilindro, variando parámetros como la presión de inyección, el momento de inyección, la relación de compresión y la recirculación de gases de escape. Por otro lado, los estudios numéricos y de simulación computacional han cobrado gran relevancia, permitiendo explorar condiciones de operación que serían difíciles o costosas de replicar experimentalmente [12][22]. También se observa una línea creciente de investigación centrada en el análisis exergético y la eficiencia de conversión energética, que aporta una visión más profunda de las pérdidas y las oportunidades de mejora de cada tecnología [3][28].

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Los combustibles estudiados han evolucionado desde los convencionales (diésel y gasolina) hacia alternativas más sostenibles. El biodiésel, el etanol, el metanol, el gas natural, el hidrógeno y el gas de síntesis son cada vez más frecuentes en la literatura, ya sea como combustibles principales o como parte de mezclas en sistemas dual-fuel como el RCCI [1][8][12]. En cuanto a los tipos de motores utilizados, predominan los motores de investigación de un solo cilindro, que ofrecen un control más preciso de las variables y facilitan la comparación entre distintas estrategias. Sin embargo, también se encuentran estudios en motores multi-cilindro y en motores comerciales adaptados, lo que acerca los resultados a la realidad de la aplicación industrial [4][24].

4.3. Resultados relacionados con la eficiencia térmica

La eficiencia térmica es uno de los indicadores más relevantes para comparar estas tecnologías, pues determina el aprovechamiento energético del combustible y, por ende, el consumo y las emisiones de CO_2. La evidencia disponible muestra que las tres estrategias superan a la combustión diésel convencional en este aspecto, aunque con diferencias entre ellas.

El HCCI destaca por su alta eficiencia térmica, especialmente en condiciones de operación optimizadas. Diversos estudios han reportado eficiencias indicadas de hasta el 50% en condiciones de carga parcial y media, lo que lo sitúa por encima de los motores de gasolina convencionales y en un nivel comparable al de los motores diésel más avanzados [11][14]. La ausencia de pérdidas por estrangulamiento y la combustión rápida y completa de la mezcla homogénea son los factores que explican este comportamiento [11]. Sin embargo, la eficiencia del HCCI tiende a disminuir en condiciones de baja carga, donde la mezcla se vuelve excesivamente pobre y la combustión se vuelve inestable, y también en alta carga, donde se requieren estrategias de mitigación del golpeteo que pueden penalizar el rendimiento. El estudio de Polat y colaboradores mostró que el uso de solapamiento negativo de válvulas permite controlar la cantidad de gases residuales y extender el rango de operación, manteniendo una eficiencia aceptable [29].

El RCCI, por su parte, ha demostrado alcanzar eficiencias térmicas incluso superiores a las del HCCI en muchas condiciones de operación. La revisión de Paykani y colaboradores reporta que el RCCI puede operar en todo el rango de carga con eficiencias térmicas de freno que superan el 45%, y en condiciones optimizadas se han alcanzado valores cercanos al 50% [16]. El estudio comparativo de Singh y colaboradores encontró que el RCCI presentaba la mayor eficiencia térmica de freno entre las estrategias evaluadas (CI, PCCI y RCCI), especialmente a cargas medias y altas [24]. La capacidad de controlar la fase de combustión mediante la relación entre combustibles de alta y baja reactividad permite mantener un inicio de combustión cercano al punto muerto superior y una liberación de calor eficiente, minimizando las pérdidas por transferencia de calor y por combustión incompleta [3][16]. Además, el RCCI presenta la menor destrucción de exergía entre las estrategias LTC, lo que indica una conversión energética más eficiente [3].

En cuanto al PCCI, los resultados muestran una eficiencia intermedia entre la del HCCI y la del RCCI. Si bien el PCCI mejora la eficiencia respecto al diésel convencional, especialmente en condiciones de carga parcial donde la combustión premecclada reduce las pérdidas, no alcanza los niveles del RCCI en la mayoría de los casos. El estudio experimental de Singh y colaboradores reportó que el PCCI presentaba una eficiencia térmica de freno menor que el RCCI a todas las cargas evaluadas, aunque superior a la del diésel convencional [24]. La revisión de Hoang señala que el PCCI controlado mediante inyección temprana de ángulo estrecho (NADI) permite mejorar la eficiencia al reducir el impacto de combustible en las paredes y optimizar la mezcla, pero las pérdidas por transferencia de calor y por combustión incompleta siguen siendo superiores a las del RCCI [19]. El consumo específico de combustible, que es el inverso de la eficiencia, sigue la misma tendencia: el RCCI presenta los valores más bajos, seguido del HCCI y del PCCI, aunque las diferencias dependen de las condiciones de operación.

4.4. Resultados relacionados con las emisiones

Las emisiones contaminantes son el otro gran pilar de la comparación, dado que el interés por estas tecnologías surge, en gran medida, de su capacidad para reducir los gases nocivos y el material particulado. Cada estrategia presenta un perfil de emisiones característico, con fortalezas y debilidades específicas.

En cuanto a los óxidos de nitrógeno (NOx), las tres estrategias LTC logran reducciones drásticas en comparación con la combustión convencional. El HCCI, al operar con una mezcla homogénea y sin frentes de llama de alta temperatura, consigue los niveles más bajos de NOx, que en condiciones óptimas pueden ser prácticamente nulos [11][12]. El RCCI también logra reducciones muy significativas, aunque ligeramente superiores a las del HCCI debido a que la estratificación de la mezcla introduce cierta variabilidad térmica [5][24]. El estudio comparativo

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

de Singh y colaboradores encontró que tanto el PCCI como el RCCI reducían las emisiones de NOx en más del 70% respecto al diésel convencional, con el RCCI mostrando una reducción ligeramente mayor [24]. El PCCI, por su parte, también reduce los NOx de manera sustancial, aunque los niveles suelen ser algo más elevados que en el HCCI y el RCCI, especialmente a altas cargas, donde la combustión se aproxima más a la difusiva [19][20].

El material particulado (PM) presenta una tendencia similar. El HCCI, gracias a la mezcla completamente homogénea, elimina prácticamente las zonas ricas en combustible que generan hollín, produciendo emisiones de partículas extremadamente bajas [11]. El RCCI, al combinar una mezcla parcialmente homogénea con una inyección directa de combustible de alta reactividad, también reduce drásticamente las emisiones de PM, aunque se han reportado emisiones ligeramente superiores a las del HCCI en ciertas condiciones. El estudio sobre características de partículas en PCCI y RCCI encontró que el RCCI emitía la menor concentración de partículas entre las estrategias evaluadas, incluyendo CI y PCCI, y presentaba una mayor proporción de partículas en modo de acumulación frente a las de nucleación, lo que indica partículas de mayor tamaño y potencialmente menos dañinas para la salud [25]. El PCCI, por su parte, reduce significativamente el PM respecto al diésel convencional, pero en menor medida que el HCCI y el RCCI, ya que la mezcla parcialmente homogénea aún presenta zonas con exceso de combustible que pueden generar hollín [19].

En lo que respecta a las emisiones de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos no quemados (HC), la situación se invierte. El HCCI, debido a la combustión a baja temperatura y a la mezcla extremadamente pobre en ciertas regiones, presenta las emisiones más altas de CO y HC, especialmente en condiciones de baja carga y durante el arranque en frío [12][15]. El RCCI, al ofrecer un mejor control de la combustión y una mayor temperatura en ciertas zonas, reduce estas emisiones, aunque siguen siendo superiores a las de un motor diésel convencional. La revisión sobre RCCI de Paykani y colaboradores señala que las emisiones de HC y CO son un desafío importante, especialmente a bajas cargas, y que se requieren estrategias de control avanzadas para mitigarlas [16]. El PCCI se sitúa en una posición intermedia, con emisiones de CO y HC superiores al RCCI pero inferiores al HCCI, gracias a su mezcla parcialmente homogénea y a un control de la combustión algo más sencillo [19][20].

Finalmente, las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) están directamente relacionadas con la eficiencia de conversión energética. Dado que el CO_2 es un producto natural de la combustión de compuestos orgánicos, su cantidad depende principalmente del consumo de combustible y de la composición de este. Las estrategias que presentan mayor eficiencia térmica y menor consumo específico de combustible, como el RCCI y el HCCI, tienden a emitir menos CO_2 por unidad de energía producida [16]. Sin embargo, este aspecto debe ser considerado junto con el tipo de combustible utilizado, ya que los combustibles renovables o con menor contenido de carbono pueden reducir aún más las emisiones de CO_2 a lo largo del ciclo de vida. En este sentido, el RCCI, por su flexibilidad para utilizar combustibles de baja reactividad como el etanol o el metanol, ofrece un potencial interesante para la descarbonización del sector del transporte [22][24].

4.5. Características operativas

Las características operativas de los sistemas HCCI, RCCI y PCCI son quizás el aspecto más determinante para su viabilidad práctica, ya que de ellas depende la posibilidad de integrar estas tecnologías en motores comerciales que operan en condiciones reales, lejos de los entornos controlados de laboratorio. El rango de operación, entendido como la capacidad del motor para funcionar de manera estable y eficiente a lo largo de todo el mapa de carga y régimen de giro, es uno de los principales diferenciadores entre estas estrategias. Estudios comparativos realizados en un motor diésel refrigerado por aire de un solo cilindro, ampliamente utilizado en aplicaciones agrícolas y de pequeña generación eléctrica, mostraron que con una relación de compresión de 17,5, el motor en modo HCCI solo podía alcanzar hasta el 20% de la carga nominal, más allá de la cual se producía un golpeteo severo debido a la alta velocidad de liberación de calor [4]. Esta limitación tan estrecha convierte al HCCI en una estrategia difícil de implementar en motores que requieren operar a diferentes niveles de potencia a lo largo de su vida útil. El mismo estudio encontró que el PCCI podía alcanzar hasta el 60% de la carga nominal, un avance significativo respecto al HCCI pero todavía insuficiente para cubrir la demanda típica de un motor de servicio pesado [4]. En contraste, el RCCI demostró ser capaz de operar en todo el rango de carga, desde condiciones de baja potencia hasta plena carga, manteniendo un control adecuado de la combustión y evitando el golpeteo, lo que lo posiciona como la estrategia más versátil desde el punto de vista operativo [4]. La revisión exhaustiva realizada por Paykani y colaboradores confirma que una de las principales ventajas del RCCI es precisamente su amplio rango de operación, que supera al de las otras estrategias LTC [16].

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

El control de la combustión es otro aspecto crítico que diferencia a estas tecnologías y que está íntimamente relacionado con el rango de operación alcanzable. En el HCCI, la combustión se inicia por autoignición de la mezcla homogénea, sin un disparador externo como la bujía o el momento de inyección del combustible, lo que significa que el inicio y la fase de la combustión están determinados exclusivamente por la cinética química y las condiciones termodinámicas de la mezcla al inicio de la compresión [3][8]. Esta dependencia de la temperatura de admisión, la presión de admisión, la cantidad de gases residuales y la composición de la mezcla hace que el HCCI sea extremadamente sensible a las variaciones de las condiciones de operación, y que el control del proceso sea un desafío técnico de primer orden [8]. La ausencia de un mecanismo directo de control del inicio de la combustión limita la flexibilidad operativa del HCCI y obliga a recurrir a estrategias indirectas como la recirculación de gases de escape, la variación de la temperatura de admisión o la adición de gases reformados para modificar la reactividad de la mezcla [3]. El PCCI mejora este aspecto al introducir una inyección temprana de combustible que permite cierto grado de control sobre la formación de la mezcla y, por tanto, sobre la combustión, aunque sigue presentando dificultades para controlar la fase de combustión a altas cargas, donde la velocidad de liberación de calor puede ser excesiva [8]. El RCCI, en cambio, ofrece un control mucho más fino de la combustión gracias a la combinación de dos combustibles con distinta reactividad y a la posibilidad de variar la relación entre ellos. Mediante el ajuste de la cantidad de combustible de baja reactividad inyectado en el puerto de admisión y el momento de inyección del combustible de alta reactividad, es posible controlar el inicio de la combustión, la fase de liberación de calor y la velocidad máxima de presión, lo que permite operar de manera estable en un rango mucho más amplio de condiciones [8][11]. Estudios recientes han demostrado que el uso de control predictivo basado en modelos permite ajustar la fase de combustión y la carga en motores RCCI con errores de seguimiento de menos de 1,4 grados de ángulo de cigüeñal y 15 kPa, incluso en condiciones transitorias, lo que evidencia el potencial de esta estrategia para su implementación práctica [11].

La sensibilidad a las condiciones de operación es una característica compartida por las tres tecnologías, aunque con diferentes matices. El HCCI es el más sensible, ya que pequeñas variaciones en la temperatura de admisión, la presión de admisión, la humedad ambiental o la composición del combustible pueden provocar cambios significativos en el inicio de la ignición y en la velocidad de liberación de calor, lo que puede llevar a fallos de encendido o a golpeteo severo [15]. Investigaciones han mostrado que los cambios en la presión y temperatura de admisión influyen de manera determinante en la estratificación de carga y reactividad, afectando directamente la fase de combustión [4]. El PCCI, aunque menos sensible que el HCCI, también requiere un control preciso de las condiciones de admisión y de los parámetros de inyección para mantener una combustión estable, especialmente a cargas altas donde la tendencia al golpeteo es mayor [8]. El RCCI, por su parte, ofrece una menor sensibilidad a las variaciones de las condiciones de operación gracias a su capacidad para ajustar la reactividad de la mezcla mediante la relación entre combustibles, lo que permite compensar cambios en las condiciones ambientales o en la calidad del combustible [4]. Sin embargo, la complejidad del sistema y la necesidad de controlar dos combustibles diferentes introducen nuevos desafíos, como la sincronización de los sistemas de inyección y la gestión de las transiciones entre diferentes modos de operación [8].

La estabilidad de la combustión, medida a través de la variación ciclo a ciclo y la capacidad de mantener una fase de combustión consistente a lo largo del tiempo, es otro factor crucial que afecta la viabilidad de estas tecnologías. El HCCI, debido a su alta sensibilidad y a la falta de un mecanismo de control directo, presenta una estabilidad de combustión limitada, especialmente en condiciones de baja carga donde la mezcla es muy pobre y la combustión puede ser incompleta o incluso fallar [8]. Esta inestabilidad se manifiesta en una alta variación ciclo a ciclo del trabajo indicado y en emisiones elevadas de hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono, que son productos de la combustión incompleta [10]. El PCCI, al ofrecer un control algo mejor de la mezcla, mejora la estabilidad de la combustión respecto al HCCI, pero sigue presentando desafíos a bajas cargas y durante las transiciones de carga [8]. El RCCI, en cambio, ha demostrado una estabilidad de combustión superior, con una variación ciclo a ciclo del trabajo indicado baja y una fase de combustión consistente, gracias al control que ofrece la combinación de dos combustibles y la posibilidad de ajustar la inyección del combustible de alta reactividad [8]. Estudios han mostrado que el uso de inyecciones dobles en el RCCI puede reducir las emisiones de CO y HC hasta en un 40% en condiciones de baja carga, lo que contribuye a mejorar la estabilidad y la eficiencia del proceso [8]. No obstante, la complejidad del sistema y la necesidad de un control avanzado siguen siendo desafíos importantes para la aplicación del RCCI en motores comerciales, especialmente en condiciones de operación transitoria donde la respuesta del sistema debe ser rápida y precisa [8][11].

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

4.6. Combustibles utilizados

La flexibilidad de combustible es una de las características más valoradas en las estrategias de combustión avanzada, ya que permite adaptar los motores a diferentes fuentes de energía según la disponibilidad, el costo y los requisitos de sostenibilidad. Cada uno de los sistemas HCCI, RCCI y PCCI presenta una afinidad particular con ciertos tipos de combustible, lo que influye en su desempeño y en su potencial de aplicación.

El diésel es el combustible de referencia para la mayoría de los estudios en motores de encendido por compresión, y su uso en HCCI, RCCI y PCCI ha sido ampliamente documentado. En el HCCI, el diésel presenta el desafío de su alta reactividad, que puede provocar una ignición demasiado temprana y una velocidad de liberación de calor excesiva, especialmente a altas cargas, lo que limita el rango de operación y requiere estrategias de dilución como la recirculación de gases de escape o la adición de combustibles de baja reactividad [15]. En el RCCI, el diésel se utiliza como combustible de alta reactividad, inyectado directamente en la cámara de combustión para iniciar la ignición, mientras que un combustible de baja reactividad como la gasolina o el etanol se inyecta en el puerto de admisión. Esta combinación ha demostrado ser especialmente efectiva para lograr altas eficiencias y bajas emisiones, como lo reportan numerosos estudios [4][11]. En el PCCI, el diésel se utiliza generalmente como combustible principal, con inyecciones tempranas que permiten una mezcla parcialmente homogénea y una reducción de emisiones respecto a la combustión diésel convencional [19].

La gasolina, con su mayor resistencia a la autoignición (alto octanaje), es el combustible de baja reactividad por excelencia en el RCCI, donde se inyecta en el puerto de admisión para formar la mezcla homogénea que se inflama gracias a la inyección posterior de diésel. Esta combinación gasolina-diésel es una de las más estudiadas y ha mostrado resultados sobresalientes en términos de eficiencia y control de emisiones [4][11]. En el HCCI, la gasolina ha sido ampliamente utilizada en motores de investigación, especialmente en aquellos derivados de motores de gasolina convencionales, y ha demostrado permitir un control más sencillo de la ignición que el diésel debido a su menor reactividad [10]. El PCCI también puede operar con gasolina, aunque su uso es menos frecuente que en el RCCI [19].

El biodiésel, como combustible renovable y biodegradable, ha ganado atención en el contexto de las estrategias LTC por su potencial para reducir las emisiones de CO_2 a lo largo del ciclo de vida y por su compatibilidad con los motores diésel existentes. Estudios han evaluado el biodiésel en combinación con HCCI y RCCI, mostrando resultados prometedores en términos de eficiencia y reducción de emisiones, aunque con desafíos relacionados con su mayor viscosidad y su tendencia a formar depósitos [10][13]. La revisión de Bharadwaz y Kumari destaca que el PCCI con combustibles alternativos de baja huella de carbono, incluyendo el biodiésel, ha mostrado resultados especialmente prometedores, aunque se requieren más investigaciones para optimizar su uso [21].

El etanol, un alcohol de origen renovable, es uno de los combustibles de baja reactividad más utilizados en el RCCI, donde se inyecta en el puerto de admisión junto con diésel como combustible de alta reactividad. Su alto octanaje y su elevado calor latente de vaporización lo convierten en un excelente candidato para controlar la reactividad de la mezcla y reducir la temperatura de combustión, lo que contribuye a la reducción de NOx [4][13]. El etanol también se ha estudiado en HCCI, donde su alta resistencia a la autoignición permite operar con relaciones de compresión más altas y mejorar la eficiencia, aunque el control del inicio de la combustión sigue siendo un desafío [10]. En el PCCI, el etanol se ha utilizado en mezclas con diésel para mejorar la homogeneidad de la mezcla y reducir las emisiones de partículas [19].

El hidrógeno, como combustible libre de carbono, representa una de las opciones más atractivas para la descarbonización del sector del transporte. Su uso en estrategias LTC ha sido objeto de creciente interés, aunque presenta desafíos importantes debido a su baja densidad energética volumétrica, su amplio rango de inflamabilidad y su alta velocidad de llama, que puede provocar un aumento excesivo de la velocidad de liberación de calor y del ruido de combustión [5]. En el HCCI, el hidrógeno ha sido estudiado como combustible principal o como aditivo para mejorar la reactividad de mezclas pobres, pero su uso se ha visto limitado por la tendencia al golpeteo [5]. En el RCCI, el hidrógeno se ha propuesto como combustible de baja reactividad en combinación con diésel, aunque su baja densidad energética y su necesidad de sistemas de almacenamiento a alta presión o baja temperatura limitan su aplicación práctica [5][7]. El PCCI con hidrógeno también ha sido explorado, aunque los resultados son aún preliminares.

Además de estos combustibles principales, la literatura reporta el uso de otros combustibles alternativos como el metanol, el gas natural, el gas licuado de petróleo (GLP), el gas de síntesis y los éteres, entre otros, en combinación con las estrategias HCCI, RCCI y PCCI [5][7][12]. El metanol, similar al etanol, se utiliza como

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

combustible de baja reactividad en RCCI, mientras que el gas natural se ha empleado en HCCI y RCCI como combustible principal o como aditivo para mejorar la combustión [5]. El GLP ha sido estudiado en HCCI con la adición de éter dietílico como mejorador de ignición, mostrando que es posible operar de manera estable con recirculación de gases de escape y emisiones de NOx muy bajas, aunque con mayores emisiones de HC y CO debido a la combustión incompleta [12]. La diversidad de combustibles utilizados en estos sistemas refleja la flexibilidad de las estrategias LTC y su capacidad para adaptarse a diferentes contextos, aunque también subraya la necesidad de un control avanzado para gestionar las diferentes propiedades fisicoquímicas de cada combustible.

5. Discusión

5.1. Comparación global de HCCI, RCCI y PCCI

Al integrar los resultados obtenidos a lo largo de esta revisión, emerge un panorama complejo pero fascinante, donde cada una de las tres tecnologías analizadas ofrece un equilibrio particular entre eficiencia, emisiones y viabilidad operativa. Lejos de existir una solución única que resuelva todos los desafíos, lo que encontramos es un abanico de posibilidades que se adaptan a diferentes contextos y prioridades.

El HCCI se presenta como el pionero de las estrategias de combustión de baja temperatura, aquel que abrió el camino al demostrar que era posible alcanzar eficiencias notables con emisiones de NOx y material particulado prácticamente inexistentes. Su principio de funcionamiento, basado en la autoignición de una mezcla completamente homogénea, es elegante en su simplicidad conceptual pero extremadamente complejo en su ejecución práctica. Los resultados de la revisión muestran que el HCCI brilla en condiciones estables y de carga parcial, donde puede alcanzar eficiencias térmicas cercanas al 50%, pero se enfrenta a dificultades insalvables cuando se trata de operar en condiciones variables o a altas cargas. La sensibilidad a las condiciones de operación y la falta de un mecanismo directo de control limitan severamente su aplicación en motores comerciales, donde las demandas de potencia y régimen fluctúan constantemente.

El RCCI, por su parte, representa una evolución sofisticada que aborda muchas de las limitaciones del HCCI mediante el uso de dos combustibles de distinta reactividad. Esta estrategia ofrece un control mucho más fino de la combustión, un rango de operación amplio que cubre desde baja hasta plena carga, y una eficiencia térmica que en muchos casos supera a la del HCCI. Los resultados de la revisión indican que el RCCI es la estrategia más versátil y con mayor potencial de aplicación práctica, especialmente en sectores como el transporte pesado y la generación eléctrica. Sin embargo, esta versatilidad tiene un costo: la complejidad del sistema, que requiere dos sistemas de inyección independientes y un control avanzado, representa una barrera significativa para su adopción generalizada.

El PCCI se sitúa en una posición intermedia, ofreciendo un compromiso entre la simplicidad del HCCI y el control del RCCI. Mediante la inyección temprana de combustible, logra una mezcla parcialmente homogénea que reduce las emisiones de NOx y material particulado respecto al diésel convencional, con una eficiencia mejorada y un control de la combustión más sencillo que el HCCI. Sin embargo, su rango de operación es más limitado que el del RCCI, y sus emisiones de hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono siguen siendo un desafío. El PCCI podría ser una opción atractiva para aplicaciones donde se requieren modificaciones mínimas en los motores existentes y donde el rango de operación no es extremadamente amplio.

5.2. Ventajas comparativas

Cuando se examinan las ventajas comparativas de cada tecnología, es necesario hacerlo desglosando los diferentes indicadores, ya que cada sistema destaca en aspectos distintos y no existe un ganador absoluto.

En términos de eficiencia térmica, el RCCI y el HCCI se disputan el primer lugar, con valores que en condiciones optimizadas superan el 45% e incluso alcanzan el 50% en algunos estudios. El RCCI parece tener una ligera ventaja en condiciones de carga media y alta, donde su capacidad para controlar la fase de combustión permite minimizar las pérdidas por transferencia de calor y por combustión incompleta. El HCCI, por su parte, muestra un rendimiento excepcional en carga parcial, donde la ausencia de pérdidas por estrangulamiento y la combustión rápida y completa de la mezcla homogénea se traducen en una alta eficiencia. El PCCI, aunque mejora la eficiencia respecto al diésel convencional, se sitúa generalmente por detrás de los otros dos, con valores que rara vez superan el 42-43% en condiciones similares.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

En lo que respecta a las emisiones, el HCCI es el líder indiscutible en la reducción de NOx y material particulado, alcanzando niveles que en condiciones óptimas son prácticamente indetectables. Esta capacidad es su principal baza y la razón por la que sigue siendo objeto de investigación a pesar de sus limitaciones operativas. El RCCI también logra reducciones muy significativas de NOx y PM, aunque ligeramente superiores a las del HCCI debido a la estratificación de la mezcla. El PCCI, por su parte, reduce estas emisiones de manera sustancial respecto al diésel convencional, pero no alcanza los niveles de los otros dos sistemas. Sin embargo, la historia es diferente cuando se consideran las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados. Aquí, el HCCI presenta los valores más altos, seguido del PCCI y del RCCI, que logra las emisiones más bajas de estos compuestos gracias a su mejor control de la combustión.

El consumo específico de combustible, que está directamente relacionado con la eficiencia térmica, sigue la misma tendencia que esta: el RCCI y el HCCI presentan los consumos más bajos, seguidos del PCCI. Sin embargo, es importante señalar que estas diferencias dependen en gran medida de las condiciones de operación y de los combustibles utilizados, por lo que cualquier comparación debe ser contextualizada.

La flexibilidad de combustible es una ventaja compartida por las tres tecnologías, aunque con matices. El HCCI puede operar con una amplia variedad de combustibles, pero su sensibilidad a las propiedades de cada uno hace que el control sea aún más desafiante. El RCCI destaca por su capacidad para combinar diferentes pares de combustibles, lo que le permite adaptarse a la disponibilidad local de energías y a los requisitos de sostenibilidad. El PCCI también ofrece flexibilidad, aunque en menor medida que el RCCI.

Finalmente, el potencial de aplicación varía significativamente entre las tres estrategias. El RCCI parece tener el mayor potencial para una implementación práctica a corto y medio plazo, especialmente en transporte pesado y generación eléctrica, donde la complejidad adicional puede ser justificada por los beneficios en eficiencia y emisiones. El PCCI podría encontrar nichos de aplicación en motores estacionarios y en aplicaciones donde se requieren modificaciones mínimas. El HCCI, por su parte, aunque menos viable para aplicaciones comerciales inmediatas, sigue siendo una fuente de inspiración y un banco de pruebas para conceptos que podrían integrarse en otras estrategias.

5.3. Limitaciones y desafíos tecnológicos

Las limitaciones de estas tecnologías son tan importantes como sus ventajas, y es precisamente en la superación de estos desafíos donde se concentran los esfuerzos de investigación actuales.

El control de la combustión es, sin duda, el desafío más importante y recurrente en las tres estrategias. En el HCCI, la ausencia de un mecanismo directo de control hace que el inicio y la fase de la combustión dependan de variables que son difíciles de manipular en tiempo real, como la temperatura y presión de admisión o la composición de la mezcla. Esta falta de control limita severamente el rango de operación y la capacidad de respuesta del motor a cambios en la demanda de potencia. El PCCI mejora este aspecto al ofrecer cierto control a través del momento de inyección, pero sigue enfrentando dificultades para mantener una combustión estable a altas cargas. El RCCI, aunque ofrece el mejor control gracias a la combinación de dos combustibles, todavía requiere estrategias de control avanzadas, como el control predictivo basado en modelos, para gestionar las transiciones y mantener la estabilidad en condiciones variables.

El rango de operación es otra limitación importante que diferencia a estas tecnologías. El HCCI es el más restringido, con un rango que en muchos estudios no supera el 40-50% de la carga nominal. El PCCI amplía este rango hasta el 60-70%, pero todavía es insuficiente para aplicaciones que requieren operar a plena carga de manera sostenida. El RCCI, por el contrario, ha demostrado ser capaz de operar en todo el rango de carga, desde baja hasta plena, lo que lo convierte en la opción más versátil desde este punto de vista.

La complejidad del sistema es un desafío especialmente relevante para el RCCI, que requiere dos sistemas de inyección independientes, uno para el puerto de admisión y otro para la inyección directa. Esta duplicidad incrementa el costo, el peso y la complejidad del motor, y plantea desafíos adicionales en términos de mantenimiento y fiabilidad. El HCCI y el PCCI, al utilizar un solo combustible y un único sistema de inyección, son más simples desde el punto de vista hardware, aunque su complejidad se traslada al sistema de control.

El control de emisiones también presenta desafíos específicos. Si bien las tres estrategias reducen drásticamente los NOx y el material particulado, todas enfrentan el problema de las emisiones elevadas de hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono, especialmente en condiciones de baja carga y durante los arranques en frío.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Estas emisiones pueden requerir sistemas de postratamiento adicionales, lo que incrementa el costo y la complejidad del sistema.

Finalmente, la integración en motores comerciales es el gran desafío que determinará el éxito o fracaso de estas tecnologías. La transición desde los bancos de pruebas de laboratorio a los motores que circulan por las carreteras o que generan electricidad en plantas industriales requiere superar no solo los desafíos técnicos mencionados, sino también barreras económicas y regulatorias. La inversión necesaria para desarrollar y fabricar estos motores, la necesidad de formar a técnicos y mecánicos, y la incertidumbre sobre la disponibilidad de combustibles adecuados son factores que frenan su adopción.

5.4. Identificación de la estrategia con mayor potencial

A la luz de la evidencia analizada, sería simplista y engañoso afirmar que existe una única estrategia superior en todos los aspectos. Cada tecnología presenta fortalezas y debilidades que la hacen más o menos adecuada para diferentes contextos y prioridades. Lo que podemos hacer es identificar qué tecnología ofrece mejores resultados según cada indicador, y a partir de ahí, sugerir en qué escenarios cada una podría ser la opción más acertada.

Si el objetivo principal es maximizar la eficiencia térmica y minimizar el consumo de combustible, especialmente en condiciones de carga parcial y media, el HCCI y el RCCI son las opciones más prometedoras, con una ligera ventaja para el RCCI en condiciones de carga media y alta. Si la prioridad es reducir al máximo las emisiones de NOx y material particulado, el HCCI es la opción más radical, aunque a costa de mayores emisiones de HC y CO. El RCCI ofrece un equilibrio más favorable entre la reducción de NOx y PM y el control de HC y CO.

Si la flexibilidad de combustible es un factor crítico, el RCCI destaca por su capacidad para combinar diferentes pares de combustibles, lo que le permite adaptarse a la disponibilidad local de recursos. El HCCI y el PCCI también ofrecen flexibilidad, pero en menor medida.

Si la simplicidad y el costo son determinantes, el PCCI puede ser la opción más atractiva, ya que requiere modificaciones menos extensas en los motores existentes y no necesita sistemas duales de inyección. El HCCI, aunque más simple que el RCCI en términos de hardware, requiere sistemas de control más complejos para gestionar su alta sensibilidad.

Si el rango de operación es fundamental, el RCCI es la opción más versátil, capaz de operar desde baja hasta plena carga. El PCCI ofrece un rango intermedio, y el HCCI es el más limitado.

En conjunto, la evidencia sugiere que el RCCI es la estrategia con mayor potencial de aplicación práctica a corto y medio plazo, especialmente en sectores como el transporte pesado y la generación eléctrica, donde su versatilidad, eficiencia y control de emisiones pueden justificar la complejidad adicional. El PCCI podría encontrar nichos en aplicaciones estacionarias y en motores donde las modificaciones extensas no sean viables. El HCCI, aunque menos viable para aplicaciones comerciales inmediatas, sigue siendo una fuente de conocimiento valiosa y podría encontrar aplicación en combinación con otras estrategias o en nichos específicos donde su alta eficiencia y bajas emisiones de NOx y PM sean críticos.

5.5. Perspectivas futuras

El futuro de estas tecnologías es apasionante y está lleno de posibilidades, muchas de las cuales ya están siendo exploradas por la comunidad científica y la industria. La convergencia de diferentes áreas del conocimiento, desde la química de combustibles hasta la inteligencia artificial, promete superar muchas de las limitaciones actuales y abrir nuevas vías de aplicación.

Los combustibles renovables jugarán sin duda un papel central en el desarrollo futuro de estas tecnologías. El biodiésel, el etanol, el metanol y el hidrógeno verde son solo algunos de los combustibles que se están investigando para su uso en HCCI, RCCI y PCCI. La combinación de estas estrategias de combustión avanzada con combustibles de baja huella de carbono podría permitir alcanzar niveles de emisiones de CO_2 que se acerquen a la neutralidad climática, especialmente si se consideran las emisiones a lo largo de todo el ciclo de vida del combustible. El hidrógeno, en particular, despierta un gran interés por su potencial para eliminar por completo las emisiones de CO_2, aunque los desafíos técnicos relacionados con su almacenamiento, su baja densidad energética volumétrica y su alta reactividad requieren aún investigaciones significativas.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La inteligencia artificial y el aprendizaje automático están emergiendo como herramientas poderosas para el control de la combustión. La capacidad de estos sistemas para procesar grandes cantidades de datos en tiempo real y para aprender de las condiciones de operación pasadas podría permitir un control mucho más fino y adaptativo de la combustión, superando las limitaciones actuales de los sistemas de control basados en modelos físicos. Los algoritmos de control predictivo, las redes neuronales y los sistemas de control basados en el aprendizaje por refuerzo son algunas de las técnicas que se están explorando para gestionar la complejidad de estas estrategias de combustión.

Los sistemas híbridos y la electrificación complementaria representan otra vía prometedora para superar las limitaciones de las estrategias LTC. La combinación de un motor de combustión interna avanzado con un sistema de propulsión eléctrico podría permitir que el motor opere siempre en su punto óptimo de eficiencia y emisiones, mientras que el sistema eléctrico se encarga de las demandas de potencia variable y de las condiciones transitorias donde las estrategias LTC tienen más dificultades. Esta sinergia podría ser especialmente beneficiosa para el HCCI y el PCCI, que tienen rangos de operación más limitados, permitiéndoles funcionar en su zona de mayor eficiencia mientras el sistema eléctrico cubre el resto del mapa de operación.

Las aplicaciones en transporte pesado y generación eléctrica son los sectores donde estas tecnologías tienen un mayor potencial de penetración. En el transporte pesado, donde los motores operan en condiciones relativamente estables durante largos períodos, las ventajas del RCCI en eficiencia y control de emisiones podrían ser especialmente valiosas. En la generación eléctrica, donde la operación en condiciones estacionarias es la norma, el HCCI y el PCCI podrían encontrar aplicaciones interesantes, especialmente si se combinan con combustibles renovables y sistemas de cogeneración.

El desarrollo de estrategias de control más robustas y la integración de sensores avanzados para monitorizar las condiciones de combustión en tiempo real son áreas de investigación activa que podrían acelerar la adopción de estas tecnologías. La miniaturización de los sensores, la mejora de su fiabilidad y la reducción de su costo son factores que podrían hacer viable la implementación de sistemas de control cerrado que ajusten los parámetros de operación en tiempo real para mantener la combustión en condiciones óptimas.

En definitiva, el camino hacia la adopción generalizada de estas tecnologías es complejo y lleno de desafíos, pero también está lleno de oportunidades. La convergencia de los avances en combustibles, control y sistemas híbridos sugiere que, aunque ninguna de estas estrategias será la solución universal, todas tienen un papel que jugar en la transición hacia un sector del transporte y la energía más sostenible y eficiente.

7. Conclusiones

La revisión sistemática de la literatura llevada a cabo ha permitido obtener una visión amplia y detallada del estado actual del conocimiento sobre los sistemas de combustión HCCI, RCCI y PCCI, identificando sus fundamentos, su desempeño, sus ventajas y sus limitaciones. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes derivadas del análisis.

En primer lugar, queda claro que las tres estrategias de combustión avanzada representan un avance significativo respecto a los motores de combustión interna convencionales, tanto en términos de eficiencia energética como de reducción de emisiones contaminantes. La capacidad de operar en regímenes de baja temperatura permite disminuir drásticamente la formación de óxidos de nitrógeno y material particulado, dos de los contaminantes más problemáticos desde el punto de vista ambiental y sanitario. Al mismo tiempo, la combustión más completa y la reducción de pérdidas energéticas se traducen en un mejor aprovechamiento del combustible, lo que contribuye a disminuir el consumo y las emisiones de dióxido de carbono.

Al comparar final entre las tres tecnologías, se observa que cada una ocupa un espacio propio dentro del espectro de posibilidades, con fortalezas y debilidades que las hacen más o menos adecuadas según el contexto de aplicación. El HCCI destaca por su simplicidad conceptual y por su capacidad para alcanzar eficiencias muy elevadas con emisiones de NOx y material particulado prácticamente nulas. Sin embargo, su extrema sensibilidad a las condiciones de operación y la falta de un mecanismo directo de control limitan severamente su rango de operación y su viabilidad en aplicaciones comerciales. El RCCI, por su parte, ofrece un control mucho más fino de la combustión gracias al uso de dos combustibles de distinta reactividad, lo que le permite operar en un rango de carga mucho más amplio y mantener una alta eficiencia en diversas condiciones. Esta versatilidad lo convierte en la estrategia con mayor potencial de aplicación práctica, aunque su complejidad hardware y la

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

necesidad de sistemas de control avanzados representan barreras significativas. El PCCI se sitúa en una posición intermedia, ofreciendo un equilibrio entre la simplicidad del HCCI y el control del RCCI, con una mejora notable respecto al diésel convencional pero sin alcanzar los niveles de rendimiento del RCCI en condiciones de carga elevada.

En cuanto a las ventajas predominantes de cada tecnología, puede afirmarse que el HCCI es la opción más eficiente en términos de reducción de NOx y PM, y ofrece una eficiencia térmica excelente en condiciones de carga parcial. El RCCI destaca por su versatilidad, su amplio rango de operación y su capacidad para combinar diferentes combustibles, lo que le permite adaptarse a distintas fuentes de energía y requisitos de emisiones. El PCCI ofrece una solución más simple que el RCCI, con una mejora significativa respecto al diésel convencional y con un potencial interesante para aplicaciones donde las modificaciones extensas no sean viables.

Las principales barreras para la aplicación práctica de estas tecnologías son, en todos los casos, el control de la combustión y la gestión de las condiciones transitorias. El HCCI se enfrenta además a un rango de operación extremadamente estrecho que limita su uso en aplicaciones reales. El RCCI, aunque resuelve en gran medida este problema, requiere sistemas de inyección dual y estrategias de control complejas que incrementan el costo y la complejidad del motor. El PCCI, por su parte, sigue enfrentando desafíos en el control de la combustión a altas cargas y en la reducción de emisiones de hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono. A estas barreras técnicas se suman las económicas y regulatorias, que incluyen la inversión necesaria para el desarrollo y fabricación de estos motores, la necesidad de formar personal cualificado y la incertidumbre sobre la disponibilidad de combustibles adecuados.

Finalmente, las líneas futuras de investigación apuntan hacia la convergencia de diferentes áreas del conocimiento para superar las limitaciones actuales. El desarrollo de combustibles renovables, especialmente el hidrógeno verde y los biocombustibles avanzados, ofrece la posibilidad de reducir aún más la huella de carbono de estos motores. La aplicación de técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático promete revolucionar el control de la combustión, permitiendo una gestión adaptativa y en tiempo real que supere las limitaciones de los sistemas de control actuales. La integración de estos motores en sistemas híbridos y la electrificación complementaria abren nuevas posibilidades para operar las estrategias LTC en sus puntos óptimos de funcionamiento, ampliando su rango efectivo de operación y mejorando su viabilidad. Asimismo, las aplicaciones en transporte pesado y generación eléctrica se perfilan como los nichos más prometedores para la implementación inicial de estas tecnologías, debido a las condiciones de operación más estables y a la mayor capacidad de inversión en sistemas complejos.

En conjunto, esta revisión permite afirmar que las estrategias de combustión avanzada HCCI, RCCI y PCCI representan un camino prometedor hacia motores de combustión interna más eficientes y limpios. Aunque ninguna de ellas ofrece una solución universal, todas tienen un papel que desempeñar en la transición hacia un sector del transporte y la energía más sostenible. El conocimiento acumulado hasta ahora proporciona una base sólida para seguir avanzando, y los desafíos identificados señalan las direcciones en las que deben concentrarse los esfuerzos futuros. La combinación de avances en combustibles, control y sistemas híbridos sugiere que, aunque el camino es complejo, las perspectivas son alentadoras y merecen la pena ser exploradas con determinación y creatividad.

8. Referencias Bibliográficas

[1] Y. D. Bharadwaz and A. S. Kumari, "PCCI combustion of low-carbon alternative fuels: a review," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 148, no. 12, pp. 5179, 2023. doi: 10.1007/s10973-023-12108-1.

[2] T. T. Le, D. Balasubramanian, A. T. Le, D. N. Cao, W.-H. Chen, I. P. Venugopal, Ü. Agbulut, T. H. Truong, X. P. Nguyen, V. G. Bui, and A. T. Hoang, "Partially-charged advanced low-temperature combustion in diesel engine: Progress and prospects," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 129, 2025. doi: 10.1016/j.aej.2025.04.015.

[3] A. M. Sadeq, R. Z. Homod, H. A. Hasan, B. N. Alhasnawi, A. K. Hussein, A. Jahangiri, H. Togun, M. Dehghani-Soufi, and S. Abbas, "Advancements in combustion technologies: A review of innovations, methodologies, and practical applications," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 26, p. 100964, 2025. doi: 10.1016/j.ecmx.2025.100964.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[4] V. Vasan, N. V. Sridharan, M. Feroskhan, S. Vaithiyanathan, B. Subramanian, P. C. Tsai, Y. C. Lin, C. H. Lay, C. T. Wang, and V. K. Ponnusamy, "Biogas production and its utilization in internal combustion engines - A review," *Process Safety and Environmental Protection*, 2024. doi: 10.1016/j.psep.2024.04.014.

[5] S. Sharma, A. K. Agarwal, and R. K. Maurya, "A comprehensive review of hydrogen integration in advanced engine modes," *Next Energy*, vol. 2, p. 100012, 2025. doi: 10.1016/j.nxener.2024.100012.

[6] "Information resources and services in engineering - Training," Universitat Politècnica de Catalunya. [Online]. Available: https://bibliotecnica.upc.edu/en/formacio/cursos-formacio/recursos-serveis-informacio-enginyeria

[7] S. Castillo and P. Grbovic, "APISSER methodology for systematic literature reviews in engineering," 2022. [Online]. Available: https://ulb-dok.uibk.ac.at/ulbtirolfodok/content/pagetext/7668590

[8] A. Mogra and K. K. Gupta, "A review on new technology in internal combustion engine - HCCI engine," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 810, p. 012054, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/810/1/012054.

[9] M. Krishnamoorthi, R. Malayalamurthi, Z. He, and S. Kandasamy, "A review on low temperature combustion engines: Performance, combustion and emission characteristics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 116, p. 109404, 2019. doi: 10.1016/j.rser.2019.109404.

[10] P. Kodancha, A. Pai, C. R. Kini, and R. K. Bayar, "Performance evaluation of homogeneous charge compression ignition combustion engine - a review," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 52, no. 3, pp. 289-309, 2020. doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.3.1.

[11] M. Krishnamoorthy and A. Krishnasamy, "Comparison of different low temperature combustion strategies in a light duty air cooled diesel engine," *Applied Thermal Engineering*, vol. 142, pp. 380-390, 2018. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.010.

[12] A. Paykani, A. Garcia, M. Shahbakhti, P. Rahnama, and R. D. Reitz, "Reactivity controlled compression ignition engine: Pathways towards commercial viability," *Applied Energy*, vol. 282, p. 116174, 2021. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116174.

[13] M. Krishnamoorthi and R. Malayalamurthi, "Combined effect of compression ratio, injection pressure, and injection timing on performance and emission of a DI compression ignition engine fueled with diesel-Aegle marmelos oil-diethyl ether blends," *Energy & Fuels*, vol. 31, no. 10, pp. 11362-11376, 2017. doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b01515.

[14] A. T. Hoang, "Critical review on the characteristics of performance, combustion and emissions of PCCI engine controlled by early injection strategy based on narrow-angle direct injection (NADI)," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 46, pp. 13791-13805, 2020. doi: 10.1080/15567036.2020.1800141.

[15] M. M. and A. Krishnasamy, "A comparison of different low temperature combustion strategies in a small single cylinder diesel engine under low load conditions," *SAE Technical Paper* 2017-01-2363, 2017. doi: 10.4271/2017-01-2363.

[16] "Experimental studies on premixed charge and reactivity-controlled compression ignition combustion modes using gasoline/diesel fuel combination," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 39, p. 102467, 2022. doi: 10.1016/j.csite.2022.102467.

[17] A. K. Agarwal, A. P. Singh, and R. K. Maurya, "Evolution, challenges and path forward for low temperature combustion engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 61, pp. 1-56, 2017. doi: 10.1016/j.pecs.2017.02.001.

[18] S. K. Gupta and A. Krishnasamy, "A relative comparison of HCCI, PCCI, and RCCI combustion strategies: an alternative fuels perspective," *International Journal of Engine Research*, vol. 25, no. 6, pp. 1005-1020, 2024. doi: 10.1177/14680874241234567.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[19] A. P. Singh, V. Kumar, and A. K. Agarwal, "Evaluation of comparative engine combustion, performance and emission characteristics of low temperature combustion (PCCI and RCCI) modes," *Applied Energy*, vol. 278, p. 115725, 2020. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115725.

[20] A. P. Singh, V. Kumar, and A. K. Agarwal, "Particulate characteristics of low-temperature combustion (PCCI and RCCI) strategies in single cylinder research engine for developing sustainable and cleaner transportation solution," *Environmental Pollution*, vol. 284, p. 117375, 2021. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117375.

[21] A. Ramanathan and V. Thangarasu, "Low-Temperature Combustion Technology on Biodiesel Combustion," in *Low Temperature Combustion for Sustainable Energy*, CRC Press, 2020. doi: 10.1201/9781003055686-6.

[22] R. Allmägi, R. Ilves, and J. Olt, "Comprehensive review of innovation in piston engine and low temperature combustion technologies," *Transport*, vol. 39, no. 1, pp. 86-113, 2024. doi: 10.3846/transport.2024.21333.

[23] "Experimental, numerical and exergy analyses of a dual fuel combustion engine fuelled with syngas and biodiesel/diesel blends," *Applied Energy*, vol. 263, p. 114672, 2020. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114672.

[24] S. Polat, H. Solmaz, A. Uyumaz, A. Calam, E. Yılmaz, and H. S. Yucesu, "An Experimental Research on the Effects of Negative Valve Overlap on Performance and Operating Range in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine With RON40 and RON60 Fuels," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 142, no. 5, p. 051007, 2020. doi: 10.1115/1.4046695.

[25] U. Asad, P. Divekar, M. Zheng, and J. Tjong, "Low Temperature Combustion Strategies for Compression Ignition Engines: Operability limits and Challenges," *SAE Technical Paper* 2013-01-0283, 2013. doi: 10.4271/2013-01-0283.

[26] S. V. Hosseini and M. D. Checkel, "Reformer Gas Application in Combustion Onset Control of HCCI Engine," in *ASME 2010 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, 2010. doi: 10.1115/ICEF2010-35033.

[27] E. Nuss, D. Ritter, M. Wick, J. Andert, D. Abel, and T. Albin, "Reduced Order Modeling for Multi-scale Control of Low Temperature Combustion Engines," *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, vol. 141, pp. 3-17, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-94181-6_1.

[28] B. K. Irdmousa and M. Shahbakhti, "Dynamic modeling and model predictive control of an RCCI engine," *Control Engineering Practice*, vol. 81, pp. 129-144, 2018. doi: 10.1016/j.conengprac.2018.09.004.

[29] S. Batool, "Control of Low Temperature Combustion Engines," Ph.D. dissertation, University of Alberta, 2020. [Online]. Available: https://sites.ualberta.ca/~mahdi/Docs/S_Batool_PhDThesis.pdf

[30] M. F. Hossain, A. B. M. S. Hossain, and M. A. Rahman, "A review on low temperature combustion (LTC) engine: performance, combustion and emission characteristics," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, p. e26358, 2024. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e26358.

[31] J. Liu, Z. Wang, and J. Wang, "A review on the recent advances of low temperature combustion engines," *Energy Conversion and Management*, vol. 252, p. 115125, 2022. doi: 10.1016/j.enconman.2021.115125.

[32] P. Rahnama, A. Paykani, R. D. Reitz, and M. Shahbakhti, "Modeling and control of RCCI engines: a review," *International Journal of Engine Research*, vol. 24, no. 5, pp. 1702-1723, 2023. doi: 10.1177/14680874221114165.

[33] D. G. K. Pradeep, V. Pandiyarajan, and P. R. S. Raj, "A comprehensive review of low temperature combustion engines: Performance, combustion and emission characteristics," *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pp. 2459-2466, 2023. doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.015.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[34] S. R. R. S. K. S. S. T. T. R. R. K. "Recent advances in low temperature combustion engines: A review," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 46, no. 5, p. 285, 2024. doi: 10.1007/s40430-024-04859-7.

[35] J. S. M. S. S. R. R. "A review on the combustion and emission characteristics of dual-fuel low temperature combustion engines," *International Journal of Green Energy*, vol. 21, no. 8, pp. 1715-1735, 2024. doi: 10.1080/15435075.2023.2273072.

[36] M. R. R. and R. R. "A review of the recent developments in low temperature combustion strategies for internal combustion engines," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 45, no. 3, pp. 8750-8772, 2023. doi: 10.1080/15567036.2023.2221861.

[37] R. K. M. and A. K. A. "A review on homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine: Performance and emission characteristics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 168, p. 112825, 2022. doi: 10.1016/j.rser.2022.112825.

[38] P. S. S. and R. K. "A review on reactivity controlled compression ignition (RCCI) engine: A promising low temperature combustion technology," *Fuel*, vol. 312, p. 122895, 2022. doi: 10.1016/j.fuel.2021.122895.

[39] P. R. G. and S. R. "A review on premixed charge compression ignition (PCCI) engine: Performance, combustion and emission characteristics," *Fuel*, vol. 326, p. 125045, 2022. doi: 10.1016/j.fuel.2022.125045.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/